

На правах рукописи
УДК 621.396.7

Евгений Анатольевич ХРЯНИН

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА
ПЕРЕДАЧИ ЗВУКОВЫХ ВЕЩАТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ**

Специальность 05.12.04

Радиотехника,

в том числе системы и устройства радионавигации,
радиолокации и телевидения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2003

Работа выполнена на кафедре радиовещания и электроакустики МТУСИ.

Научный руководитель кандидат технических наук, профессор А.П. Ефимов

Официальные оппоненты Волков А.А.- доктор технических наук, профессор
Городников А.С.- кандидат технических наук, с.н.с.

Ведущая организация АНО Научно-технический центр информационных технологий и систем (НТЦ "ИНТЕС")

Защита диссертации состоится «11» декабря 2003 г. в «13» часов на заседании диссертационного совета К.219.001.02 при Московском техническом университете связи и информатики, ауд. А-455 .

Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, 8а, МТУСИ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «4» ноября 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
К.219.001.02
к. т. н., доцент



О. В. Матвеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Исследования и практические разработки в области оценки качества звукопередачи ведутся с момента появления звукового вещания как отрасли. Однако в настоящее время интерес к ним увеличился. Это вызвано острой конкуренцией на новом рынке услуг, открывшимся с развитием коммерческого многопрограммного вещания, внедрением техники передачи, обработки и кодирования сигналов в цифровой форме, а также результатами последних исследований в области анализа звуковых сигналов и звуковосприятия.

Эффективность систем вещания и связи, их конкурентоспособность, технико-экономические показатели во многом определяются степенью согласования параметров канала передачи не только со свойствами сигнала, но и с особенностями восприятия звукового сигнала абонентами – слушателями. Степень такого согласования, в конечном итоге, определяет субъективное качество передачи сигнала по каналу звукового вещания.

Качество передачи и методы его оценки регламентируются соответствующими нормативными документами. В нашей стране это ГОСТ 11515-91, ГОСТ 50757-95, ГОСТ 13924-80, ГОСТ Р 51742-2001 и ряд других. Однако в связи с бурным развитием и внедрением технологий адаптивной психоакустической обработки вещательного сигнала используемые методики оценки качества передачи с использованием малокомпонентных тестовых сигналов оказываются малоэффективными. Такое положение приводит к появлению в каналах звукового вещания звеньев, контроль которых возможен только с использованием субъективно-статистических испытаний (ССИ) – так называемых «адаптивных звеньев». Вместе с тем, основным недостатком ССИ, ограничивающим их широкое применение, является высокая трудоемкость и необходимость выведения канала из эксплуатации на длительное время.

Таким образом, актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью выявления и оценки ненормированных искажений сигнала звукового вещания (СЗВ) в существующих адаптивных трактах на основе анализа изменений статистических свойств передаваемых реальных вещательных сигналов.

Проблемам анализа звуковых сигналов посвящены работы ученых В. В. Фурдуева, Л. В. Шитова, В. А. Нюренберга, С. Л. Мишенкова, Б. Р. Левина, А. А. Харкевича, А. В. Никонова, Л. З. Папернова, З. Н. Резвяковой, Дж. Беллами, М. А. Сапожкова и других. Вопросы оценки качества передачи сигнала вещания и связи рассмотрены в работах И. Е. Горона, Г. Б. Аскинази, С. Л. Мишенкова, В. П. Гученко, Ю. А. Ковалгина, М. Л. Сурова, М. Г. Иоффе, И. Г. Дрейзена и других.

Работа является естественным продолжением исследований, которые проводились и проводятся на кафедре РВ и ЭА под руководством и при участии таких ученых и специалистов, как: И. Г. Дрейзен, И. Е. Горон, В. А. Нюренберг, Л. З. Папернов, М. А. Сапожков, С. Л. Мишенков, С. Г. Рихтер, О. Б. Попов, Г. А. Донцова, С. А. Литвин.

Цель и основные задачи работы

Целью работы является разработка методики объективной оценки качества передачи СЗВ по современным адаптивным каналам и трактам, а также выбор и обоснование технических решений, обеспечивающих возможность объективной оценки качества передачи реального вещательного сигнала без вывода канала из эксплуатации.

Методы исследования. В работе использовались элементы теории звуковосприятия и звукообразования, методы математической статистики, спектральный анализ.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
С.Петербург
09 003 акт 694

онного анализа, а также методы оценки качества вещательного сигнала. Все эксперименты выполнены с использованием современной вычислительной техники и доработанного автором программного обеспечения, созданного научной группой кафедры Радиовещания и Электроакустики (РВ и ЭА).

Новизна работы и новые научные результаты

1. Показано [1, 6, 7], что существующее метрологическое обеспечение не позволяет осуществлять объективный контроль качества передачи вещательного сигнала, прошедшего тракты с адаптивной обработкой (включая компактное представление). Отобраны наиболее информативные параметры вещательного сигнала, вычисляемые на коротких временных интервалах и позволяющие использовать изменение их интегральных статистических распределений для формирования объективной оценки качества передачи, коррелированной с субъективной оценкой.
2. Разработана [3, 4, 11] шкала соответствия между изменением интегральных статистических распределений предложенных параметров вещательного сигнала и заметностью изменений сигнала, что позволило ограничить набор возможных параметров и выделить три группы: энергетическую, спектрально-кеспетральную и группу параметров формы аналитической огибающей вещательного сигнала. Предложено вычислять энергетические параметры на длительности 200 мс, спектрально-кеспетральные параметры — на длительности 20 мс, а параметры формы огибающей оценивать на длительности 2 мс, что совпадает с временем интеграции слуха по громкости, частоте и пороговой чувствительностью слуха к изменению огибающей звукового сигнала, соответственно.
3. Разработан [3] способ повышения точности спектральной оценки, учитывающий особенности вещательных сигналов, включающих звуковые объекты длительностью от 40 мс. Способ основан на быстром преобразовании Фурье комплексно-представленного многократно транспонированного в пределах бина сигнала с точностью 0,5 дБ по амплитуде, 1,5 Гц по частоте, 8° по фазе, что позволяет приблизиться к точности периферического слухового анализатора. Предложенный способ позволяет производить оценку АЧХ адаптивного тракта и выявлять нелинейные искажения на реальном вещательном сигнале.
4. Предложены [3, 4, 6, 11] дополнения к существующим нормативным документам в виде разработанной методики комплексного статистического оценивания качества передачи сигналов звукового вещания, позволяющие контролировать современные адаптивные каналы и тракты на реальном сигнале без вывода их из эксплуатации, с автоматизацией процесса оценивания по критерию заметности искажений, балльной оценки качества передачи. Определены также оптимальные диапазоны значений предложенных в работе статистических параметров вещательного сигнала по критерию предпочтительности для информационно-музыкальных программ.

Личный вклад автора. Основные результаты, приведенные в диссертации, включая версию программного обеспечения для оценки качества передачи вещательных сигналов, получены автором лично.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- Разработана методика оценивания качества передачи СЗВ в трактах с адаптацией параметров к передаваемому сигналу, позволяющая формировать объективную оценку качества передачи в каналах, заведомо не обеспечивающих сохранение формы сигнала и контролируемых только с использованием ССИ. Предлагаемая

методика позволяет проводить оперативную оценку на реальном вещательном сигнале, обеспечивая результаты оценки близкие к результатам ССИ.

- Разработано и внедрено программное обеспечение, позволяющее реализовать автоматизированную аппаратную оценку качества передачи вещательного сигнала без вывода тракта передачи из эксплуатации.
- Создана база «критических» звуковых сигналов и часовых фрагментов реальных радиовещательных программ для оценки качества передачи по каналам и трактам звукового вещания, использующим адаптивные алгоритмы обработки сигнала.

Внедрение результатов работы

<i>Предмет внедрения</i>	<i>Область внедрения</i>
Программа оценки качества передачи в адаптивных трактах сети первичного и вторичного распределения сигнала вещания	ЗАО «ТРК «Эфир»»
Программа оценки изменений сигнала в устройствах адаптивной обработки вещательного сигнала в трактах вторичного распределения	АНО Научно-технический центр информационных технологий и систем (НТИЦ "ИНТЕС")
Использование в научно-исследовательских работах метода оценки качества передачи по адаптивным звеньям и трактам	Предприятия связи и звукового вещания по заказу Министерства связи и информатизации Российской Федерации
Лабораторная работа из созданного цикла работ "Субъективная оценка качества речевых сигналов при их обработке и кодировании"	Учебный процесс кафедры РВ и ЭА МТУСИ

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты исследований докладывались автором на совещаниях специалистов кафедры РВ и ЭА, 10-й Межрегиональной научно-технической конференции "Обработка сигналов в системах двусторонней телефонной связи" (Пушкинские горы, 2000), а также на НТК профессорско-преподавательского состава и ряде семинаров МТУСИ (2000-2003). Разработанные модули программного обеспечения, методики и результаты исследований сигналов звукового вещания вошли в отчеты по НИР НТК-68 (темы: №№ 6802/99 "Эмоция", 6801/01 "Эффект", 6802/01 "Оценка").

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 5 тезисах выступлений на НТК и 6 статьях среди которых 2 единоличных.

Основные положения, представленные к защите. На защиту выносятся следующие положения:

1. Все современные каналы и тракты звукового вещания являются адаптивными. В то же время существующая нормативная база не обеспечивает объективную оценку качества передачи по современным адаптивным аналоговым и цифровым каналам, не предполагающим сохранение формы сигнала.

2. Объективная оценка качества передачи в каналах, коррелированная с результатами субъективного оценивания, может быть сформирована на основе анализа изменений статистических параметров вещательного сигнала по критериям заметности его изменений, балльной оценки и по критерию предпочтительности звучания. При формировании оценки могут использоваться энергетические, спектральные, келстральные параметры, а также параметры формы аналитической огибающей вещательного сигнала, вычисляемые на длительностях, соизмеримых с временем интеграции слуха по громкости (200 мс), частоте (20 мс) и пороговой чувствительности слуха к изменению огибающей звукового сигнала (2 мс).

3. Повышение точности спектральной оценки на основе быстрого преобразования Фурье комплексно-представленного многократно транспонированного в пределах бина сигнала, приближает точность оценки спектральных составляющих к возможностям периферического слухового анализатора: 0,5 дБ по амплитуде, 1,5 Гц по частоте, 8° по фазе. Применение способа позволяет производить оценку АЧХ адаптивного тракта на *реальном вещательном сигнале* и выявлять нелинейные искажения.

4. При сравнительном анализе звуковых дискретизированных сигналов их предварительное нормирование по значению вероятности превышения заданного уровня предпочтительнее нормирования по максимальному значению сигнала, что согласуется с физикой звуковосприятия. В сочетании с повышением точности спектрального анализа это позволяет приблизить результаты анализа изменений статистических параметров вещательных сигналов к результатам субъективно-статистических испытаний.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка принятых сокращений, списка литературы и пяти приложений. Работа содержит 146 листов, в том числе 125 листов основного текста, 48 рисунков, 19 таблиц. В списке литературы 99 наименований. Приложения размещены на 64 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *Введении* обоснована актуальность темы исследований и разработок, сформулирована цель работы, перечислены основные научные результаты диссертации, определена их практическая ценность и области применения, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Практически все современные аналоговые и цифровые тракты передачи сигналов звукового вещания (СЗВ) содержат устройства адаптивной обработки и устранения избыточности сигнала, существенно изменяющие его свойства (АРУРы, компандеры, аудио-процессоры, системы MPEG) [2, 6, 10]. В *Главе 1* рассмотрены возможные причины искажений вещательного сигнала при передаче по реальным аналоговым и цифровым трактам [4, 6, 11]. Показано, что применение подобных устройств приводит к заметным изменениям передаваемых сигналов, которые не могут быть нормированы в рамках методики ГОСТ 11515-91. Это связано, в первую очередь, с закономерным повышением качества обработки и передачи вещательных сигналов за последние 50 лет и необходимостью развития методики оценки качества на основе тестовых сигналов, заложенной при создании ГОСТ 11515.

В результате делается вывод о том, что постоянное развитие систем обработки и передачи ЗС по каналам и трактам снижает эффективность методик оценки качества, основанных на использовании простых тестовых сигналов. Существующая методика оценки

качества передачи СЗВ (ГОСТ 11515-91) требует развития с целью ее использования для выявления и оценки искажений в современных адаптивных трактах.

В *Главе 2* проводится обзор существующего метрологического обеспечения звукового вещания. Выделяются два основных направления развития методов оценки качества передачи СЗВ по каналам и трактам: объективное и субъективное [3, 11]. Особенностью существующих объективных методов оценки является широкое использование малокомпонентных гармонических измерительных сигналов при исключении устройств адаптации свойств сигнала к возможностям конкретного канала. В результате, измерениям подвергается тракт с одними параметрами, в то время как передача реального сигнала, фактически, осуществляется по тракту с другими параметрами [4, 6]. Здесь развитие идет в направлении внедрения компьютерной техники и автоматизации измерений.

В нашей стране есть еще одно направление развития объективных методов оценки — это анализ статистических свойств вещательных сигналов на входе и выходе вещательного тракта — ведет свое начало с работ ученых кафедры РВиЭА МГУСИ В.А.Нюренаберга, С.Л. Мищенко. Успехи в этой области определяются развитием вычислительной техники и методов анализа СЗВ, поэтому именно в последние годы интерес к этому направлению значительно возрос.

Наиболее точным методом оценки качества передачи СЗВ является метод субъективно-статистических испытаний (ССИ), однако он не всегда применим вследствие естественной трудоемкости. Логическим развитием ССИ явился метод экспресс-оценки FSQ, разработанный Акустическим центром МГУСИ. Он позволяет уменьшить затраты времени и повысить точность.

Попыткой объединить достоинства объективных и субъективных методов оценки стали работы по моделированию слухового восприятия человека. В нашей стране этим вопросом занимались специалисты научной группы кафедры РВиЭА (НИР «Лемма», 1996 г.). С 1992 года в США также ведутся работы над созданием подобной системы оценки последствий влияния на СЗВ алгоритма MPEG. Этим занимаются ученые подкомитета SC-02 «Цифровой звук» комитета Стандартов AES [6]. В результате в 1992 году появились алгоритмы PAQM (*Perceptual audio quality measure* – психоакустическое измерение качества звучания) и PERCEVAL (*Perceptual evaluation* – психоакустическая оценка). В 1996 алгоритм PSQM (*perceptual speech quality measure*) был одобрен в качестве рекомендаций по оценке передачи речи ITU-T P.861. В феврале 2001 алгоритм PESQ (*Perceptual Evaluation of Speech Quality*) был одобрен в качестве новых рекомендаций ITU-T Rec. P.862. Тогда же в 2001 году алгоритм по оценке уже вещательных сигналов PEAQ (*Perceptual Evaluation of Audio Quality*) получил статус рекомендации ITU-R BS.1387 [6].

Несмотря на достижения в области метрологии звукового вещания, задача поиска методов для оперативного контроля качества передачи сигнала остается открытой: необходимо, чтобы метод оценивания базировался на использовании *объективных параметров сигнала*, но в то же время учитывал особенности восприятия звуковой программы слушателем.

Глава 3 посвящена разработке методики оценки качества передачи сигналов ЗВ на основе статистических распределений их параметров – методу комплексного статистического оценивания (МКСО).

В работе предлагается оценивать различие статистических распределений параметров реальных вещательных сигналов, формируемых за время, соответствующее интервалу интеграции слухового анализатора по громкости (200 мс), частоте (20 мс) и пороговой чувствительности слуха к изменению огибающей звукового сигнала (2 мс) [1-4, 6]. В качестве энергетических параметров используются две разновидности относительной

средней мощности (ОСМ), отличающихся способом нормирования. ОСМ определяется как отношение мощности сигнала на интервале анализа (200 мс) к мощности синусоиды с амплитудой, равной максимальному мгновенному значению сигнала на интервале анализа (сигнальная ОСМ или ОСМс) или значению, превышаемому в течение 1% времени от общей длительности звукового фрагмента (канальная ОСМ или ОСМк). Для анализа параметров формы была выбрана крутизна изменения огибающей сигнала на интервалах ее нарастания и спада (т.е. атаках и спадах звуковых объектов). Для анализа изменений сигнала в частотной области выбраны такие статистические параметры, как среднеквадратичное отклонение АЧХ тракта передачи и пик-фактор кепстра. В главе показана информативность выбранных параметров и связь их с характеристиками качества звучания, оцененными субъективно.

Для анализа расхождений распределений (нормированных частот появления значений - НЧПЗ) статистических параметров исходного и искаженного вещательных сигналов наиболее эффективно интегральное отклонение (ИО) одного распределения от другого (рис.1), которое отражает изменение не только среднего, среднеквадратического и медианного значений, но также изменение коэффициентов асимметрии и эксцесса, которое часто встречается при анализе изменений СЗВ.

Для подготовки двух сигналов к их последующему сравнению разработана программа нормирования цифровых вещательных сигналов по уровню квантования, превышаемому в течение заданного процента времени ("по проценту") [5, 11].



Рис.1 Интегральное отклонение

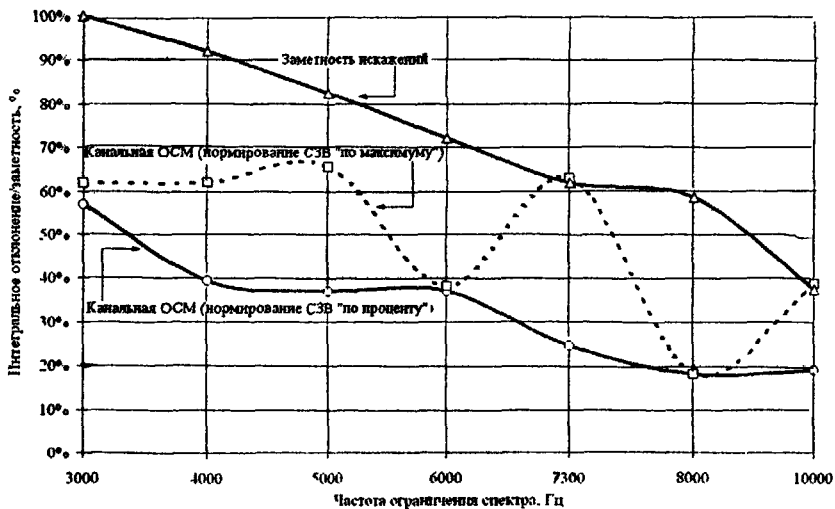


Рис.2 Оценки изменения канальной ОСМ при разных типах нормирования для искажений типа «ограничение спектра сигнала сверху» (скрипка)

Показано на примере ограничения спектра и оценок изменения распределения канальной ОСМ, что для задач анализа изменений в СЗВ данный вариант нормирования способствует получению оценок более коррелированных с заметностью, чем широко используемое нормирование сигнала по максимальному пику (рис.2).

Алгоритм нахождения параметров формы представлен на рис. 3.

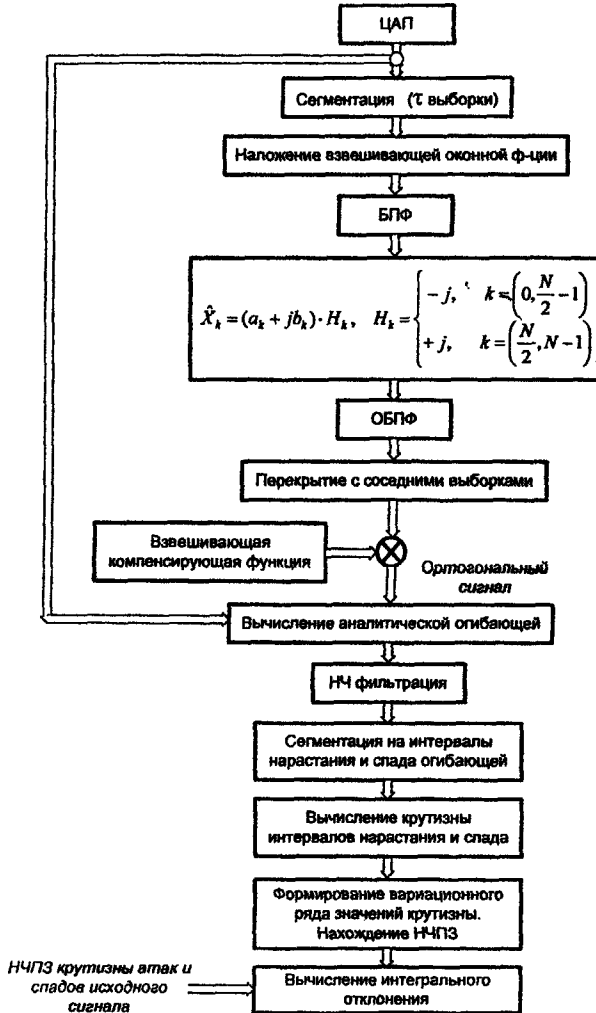


Рис.3 Алгоритм оценивания параметров формы

На последнем этапе анализа производится сравнение статистических характеристик формы огибающей для обработанного и исходного сигналов (рис.3).

В соответствие со свойствами слуха и самого сигнала при анализе спектральных параметров СВВ допустимо разбивать сигнал на фрагменты длительностью не более 15-20 мс (время интеграции слуха по частоте). Расстояние между спектральными составляющими БПФ оценки такого фрагмента превышает 50 Гц, в то время, как для согласования спектральных оценок со свойствами слуха необходима разрешающая способность не более 20 Гц.

Для анализа спектральных параметров разработан способ повышения точности определения положения спектральных составляющих на частотной оси. Улучшения точности оценки и разрешения удается добиться, проводя кроме анализа самого сигнала, параллельный анализ набора транспонированных в пределах бина по частоте сигналов. Применение способа позволяет производить оценку АЧХ реальном вещательном сигнале с точностью, соответствующей точности слухового анализатора.

Используемый алгоритм формирования оценок мгновенного амплитудного спектра (МАС) сигнала вещания предполагает:

- наложение оконной функции на исходный сигнал;
- умножение полученного колебания на набор комплексных синусоид для получения промежуточных оценок спектра (формирование транспонированных по частоте сегментов сигнала);
- БПФ-анализ полученных последовательностей;
- формирование суммарной оценки мгновенного спектра;
- прореживание суммарной оценки по локальным максимумам амплитудного спектра.

В целом, методика анализа спектрально-кестральных параметров включает следующие операции:

1. Вычисление МАС на интервалах, соответствующих времени интеграции периферического слухового анализатора по заметности изменения спектрального состава сигнала.
2. Вычисление среднестатистической тенденции изменения мгновенных спектров сигнала после обработки – «средней АЧХ».
3. Вычисление среднеквадратического отклонения (СКО) «средней АЧХ» от идеальной АЧХ канала.
4. Вычисление кестра по имеющемуся амплитудному спектру путем логарифмирования и повторного БПФ и получение вариационного ряда значений кестра, распределенных по длительности звукового сигнала.
5. Вычисление вариационного ряда пик-фактора кестра.
6. Подсчета НЧПЗ пик-фактора кестра.
7. Расчета ИО НЧПЗ пик-фактора кестра.

Сравнение спектрально-кестральных статистических характеристик для обработанного и исходного сигналов производится на этапах 2,3 и 7.

Алгоритм нахождения энергетических параметров включает в себя проведение следующих операций для обработанного и исходного сигналов:

1. Сегментации сигнала на интервалы, соответствующие времени интеграции слуха (200 мс).
2. Вычисления на каждом из интервалов средней мощности.
3. Деление средней мощности на квадрат значения нормированного уровня (ОСМк) или квадрат значения уровня, максимального на интервале (ОСМс). Для одного интервала (I) значения ОСМс _{i} и ОСМк _{i} находятся следующим образом:

$$OCM_{C_i} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N A_i^2;$$

$$OCM_{K_i} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N A_i^2$$

где A_i – значение уровня квантования i -того дискретизированного отсчета на интервале;

N – количество отсчетов на интервале 200 мс;

$A_{макс}$ – значение уровня квантования, максимального на интервале анализа;

$A_{норм}$ – значение уровня квантования, превышаемого в течение 1% времени.

4. Разбавления полученного вариационного ряда значений ОСМ на N интервалов ($N > 100$).

5. Подсчета НЧПЗ ОСМ в каждом из N интервалов.

6. Сведения вместе статистических данных исходного и искаженного сигналов и расчета ИО НЧПЗ ОСМ на всем диапазоне появления значений.

На последнем этапе производится сравнение статистических характеристик ОСМ для обработанного и исходного сигналов.

Сформированный набор статистических параметров вещательного сигнала является информативным для оценки искажений СЗВ и их комплексное использование позволит реализовать систему объективной оценки качества передачи сигнала по адаптивным каналам ЗВ. Предлагаемый в работе алгоритм основан на сборе статистики реальных вещательных сигналов и последующем ее анализе. Выделение статистических параметров осуществляется на основе знаний особенностей слухового восприятия человека и с использованием теории случайных процессов. Отказ от детерминированного нормирования в пользу вероятностного повышает корреляцию оценок объективных параметров СЗВ и соответствующих оценок заметности.

Глава 4 посвящена оценке корреляционной связи изменений статистических параметров и субъективной заметности, а также возможности применения МКСО для задач оценки изменений сигнала в каналах и трактах ЗВ.

Были сформированы две базы сигналов ЗВ.

1. Сформирована база музыкальных сигналов разных жанров, аналогичная базе, использованной при исследованиях субъективной заметности искажений под руководством проф. И.Е. Горона [5]. Это дало возможность использовать в нашем исследовании в качестве опорного материала накопленные результаты масштабных ССИ, проводимых в конце 1950-х годов Научно-исследовательским институтом радио Министерства связи СССР совместно с кафедрами радиовещания и акустики Московского и Ленинградского институтов связи, а также Научно-исследовательским институтом городской и сельской телефонной связи Министерства связи в Ленинграде. Таким образом, полученная точность сводных кривых заметности искажений и помех при достоверности $\alpha = 0,99$ не менее $\pm 6\%$. Показано, что жанры, длительности и спектры выбранных для нашего исследования звуковых фрагментов сходны с аналогичными параметрами сигналов, приводимыми в исследованиях 1950-х годов. Это подтвердило правильность выбора отрывков для проведения нашего эксперимента.

2. Сформирована база часовых фрагментов программ 10-ти популярных в России радиовещательных станций [2, 4]. Наличие базы даст возможность анализа параметров СЗВ на фрагментах программ реальных российских радиостанций с длительностями, превышающими интервал стационарности смешанного вещательного сигнала, который составляет 30...40 мин.

Обе базы записаны на долговечных носителях (компакт-дисках) в цифровом 16-битном формате записи звука (WAV), удобном для анализа на ПК.

По методу МКСО с использованием двух баз сигналов ЗВ был проведен анализ основных искажений, вносимых в сигнал каналом, таких как: спад АЧХ тракта на нижних и верхних частотах, пики на АЧХ тракта передачи, нелинейные искажения, а также добавление аддитивного белого шума. Кроме этого, проведен анализ изменений в сигнале после прохождения им модели канала с МР3 кодеком [2, 3, 11].

Полученные результаты оценки изменений сигнала по методу МКСО были сопоставлены с результатами соответствующих ССИ. В качестве критерия оценки степени корреляционной связи результатов объективных и субъективных оценок изменений в сигнале был выбран коэффициент корреляции r , определяемый как [3]:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m x_i y_j n_{ij} - (\sum_{i=1}^l x_i n_i) (\sum_{j=1}^m y_j n_j)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^l x_i^2 n_i - (\sum_{i=1}^l x_i n_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{j=1}^m y_j^2 n_j - (\sum_{j=1}^m y_j n_j)^2}}$$

где x_i, y_j — значения объективной и субъективной оценок конкретного искажения соответственно;

n_{ij} — частоты пар (x_i, y_j) ;

$n_i = \sum_{j=1}^m n_{ij}$, m — число интервалов по переменной y ;

$n_j = \sum_{i=1}^l n_{ij}$, l — число интервалов по переменной x .

В случае, когда данные не сгруппированы в виде корреляционной таблицы и представлены n пар чисел (x_i, y_i) , формула для вычисления коэффициентов корреляции упрощается:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}$$

На основании этой формулы был проведен расчет и получен коэффициент корреляции по всем используемым параметрам не менее 0,74 (74%), а в среднем 0,95 (95%), в зависимости от музыкального материала и вида искажений.

В результате доказана высокая корреляция изменений выбранных статистических параметров с изменением субъективной заметности при использовании искажений, вводимых в сигнал при разработке ГОСТ 11515-91. Высокая корреляция подтверждает информативность предложенных параметров для задач оценки качества передачи СЗВ на реальных вещательных сигналах и возможность использования предлагаемого МКСО для оценки качества передачи СЗВ по современным каналам.

В Главе 5 приведены таблицы сопоставления результатов субъективных испытаний и оценок изменений статистических параметров (интегральных отклонений) по трем принятым критериям: критерию заметности, критерию балльной оценки, а также предложено нормировать вещательные программы радиостанций по критерию предпочтительности на основе их рейтинга.

В табл.1 приведены результаты оценки ограничения спектра снизу и соответствующей заметности искажений. Такие же таблицы составлены для случая ограничения спектра сверху, добавления белого шума и случая нелинейных искажений.

Таблица 1

Соотношения заметности изменений СЗВ (в процентах) и отклонения статистических параметров

Параметр	Процент заметности изменений сигнала звукового вещания (ограничение спектра снизу), %				
	30	40	50	60	70
<i>Энергетические параметры</i>					
ИО ОСМс, %	55	60	60	65	70
ИО ОСМк, %	35	45	50	55	63
<i>Параметры формы</i>					
ИО КПФ, %	20...32	25...35	25...35	35...40	45...50
ИО КЗФ, %	20...32	25...35	25...35	35...40	45...50
<i>Спектральные параметры</i>					
СКО АЧХ (лин), %	—	—	—	—	—
СКО АЧХ (лог), %	3	7	10	15	20
ИО ПФ КХ, %	32	35	35	35	35

В таблице используются следующие обозначения:

КПФ¹ – крутизна передних фронтов;

КЗФ – крутизна задних фронтов;

СКО АЧХ (лин) – среднее квадратическое отклонение АЧХ от прямой (по линейной шкале частот)

СКО АЧХ (лог) – среднее квадратическое отклонение АЧХ от прямой (по логарифмической шкале частот);

ПФ КХ – пик-фактор кепстральной характеристики.

Отношение ИО КПФ (обозначим как α) к ИО ОСМс (обозначим как β) позволяет определить, по какой таблице производить оценку. Если $\frac{\alpha}{\beta} < 1$, то оценка производится на основе таблиц ограничения спектра сверху или снизу (частотные искажения). В этом случае необходимо оценить соотношение ОСМс/ОСМк. Если оно больше 2, то оценка производится по таблице, соответствующей ограничению спектра сверху, если меньше 2 – по таблице, соответствующей ограничению спектра снизу. Если $1 \leq \frac{\alpha}{\beta} < 2$, то оценка производится по таблице, соответствующей добавлению шума. Если $\frac{\alpha}{\beta} \geq 2$, то оценка производится по таблице, соответствующей нелинейным искажениям. Кроме того, для искажений, вносимых алгоритмом MPEG, проведено нормирование изменений статистических параметров в зависимости от балльной оценки искажений. Результаты нормирования представлены в табл. 2.

¹ Здесь и далее подразумевается отклонение распределений (нормированной частоты появления значений НЧПЗ) параметра до и после прохождения сигналом канала, но для краткости термин "НЧПЗ" опускается.

Таблица 2

Соотношения заметности изменений СЗВ (в баллах) и отклонения статистических параметров

Параметр	Балльная оценка (устранение избыточности в цифровом сигнале), баллы				
	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
<i>Энергетические параметры</i>					
ИО ОСМс, %	43	48	52	52	55
ИО ОСМк, %	7	8	12	13	15
<i>Параметры формы</i>					
ИО КПФ, %	27	28	30	31	32
ИО КЗФ, %	30	32	37	40	45
<i>Спектральные параметры</i>					
СКО АЧХ (лн), %	3	3,5	4,3	4,5	5
СКО АЧХ (лог), %	5,8	6,1	6,2	6,2	6,35
ИО ПФ КХ, %	23	27	28	30	33

Сравнительный анализ параметров сигнала на входе и выходе канала передачи позволяет сформировать объективную оценку качества передачи, хорошо коррелирующуюся с результатами субъективно-статистических измерений по критериям «заметности изменений сигнала» или балльной оценки. К сожалению, в целом ряде практических приложений таких оценок недостаточно. К настоящему времени изменения сигнала в трактах формирования, первичного и вторичного распределения столь велики и разнообразны, что зачастую не укладываются в вышеприведенные шкалы. Появилась необходимость формализованной шкалы объективных абсолютных параметров сигнала, сформированных по критерию «предпочтительности» его слушателем. В главе 5 приведено подобное исследование на основе имеющейся базы радиовещательных сигналов и рейтингов наиболее популярных в России радиостанций. В табл. 3 представлены наиболее предпочтительные средние значения статистических параметров.

Таблица 3

Наиболее предпочтительные средние значения статистических параметров программ радиовещательных станций

Параметр	Диапазон предпочтительных значений параметра
<i>Энергетические параметры</i>	
ОСМк	0,13...0,14
<i>Параметры формы</i>	
Средняя крутизна атак, дБ/с	25
Средняя крутизна спадов, дБ/с	20
Преобладающие ритмические частоты, Гц	0,1...0,25
<i>Спектральные параметры</i>	
Подъем НЧ, дБ	5...6
Подъем ВЧ, дБ	6...7
Пик-фактор кепстра	0,068
<i>Субъективные параметры</i>	
Уровень придыхания	0,11...0,12

Из таблиц видна зависимость статистических параметров и субъективной заметности. Таким образом, в процессе тестирования канала сравнение полученных данных об отклонении распределений статистических параметров исходного сигнала и сигнала,

прошедшего канал, позволяет предсказать результат ССИ и проводить оперативный контроль на реальном вещательном сигнале без исключения канала из эксплуатации.

На языке объектного программирования *Delphi 5.0* было разработано программное обеспечение, реализующее этот принцип и включающее в себя все описанные процедуры и алгоритмы. Разработана методика тестирования канала на основе реальных вещательных сигналов и в двух вариантах: с исключением канала из эксплуатации и без исключения канала из эксплуатации. Реализация методики осуществляется с помощью аппаратуры комплексного статистического оценивания (АКСО), состоящей из ПК в мультимедийной комплектации и разработанного программного обеспечения. В случае исключения канала из эксплуатации анализ статистических параметров проводится на основе звуковых фрагментов, входящих в состав АКСО. В режиме проведения оценки без исключения канала из эксплуатации данные статистического анализа входного (нескаженного) сигнала передаются по служебному каналу (интернет-каналу) на выход, где и производится сравнение параметров.

В приложениях приведены спектры использованных звуковых фрагментов, АЧХ моделей фильтров, графики зависимостей измененных статистических параметров СВ от степени вносимых искажений, текст основных модулей программного обеспечения и протокол субъективных испытаний по оценке качества алгоритмов MPEG.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Итогом проведенной работы является следующее:

1. Показано, что существующее метрологическое обеспечение не позволяет осуществлять объективный контроль качества передачи вещательного сигнала, прошедшего тракты с адаптивной обработкой, включая компактное представление. Установлено, что наиболее информативными параметрами реального вещательного сигнала в задачах анализа качества его передачи по адаптивным каналам являются статистические параметры трех групп: энергетической, спектрально-кестральной и группы параметров формы аналитической огибающей вещательного сигнала, вычисляемых на длительностях, соответствующих временам интеграции слуха по громкости (200 мс), частоте (20 мс) и пороговой чувствительностью слуха к изменению огибающей звукового сигнала (2 мс).
2. Найдена корреляционная зависимость между субъективной заметностью искажений сигнала и интегральным отклонением распределений введенных статистических параметров. Доказано, что изменение этих распределений позволяет формировать объективную оценку качества передачи, коррелированную с субъективной оценкой с коэффициентом корреляции, составляющем в среднем 95%.
3. Разработан способ оценки АЧХ тракта и нелинейных искажений на реальном вещательном сигнале на основе результатов быстрого преобразования Фурье комплексно-представленного многократно транспонированного в пределах бина сигнала с точностью 0,5 дБ по амплитуде, 1,5 Гц по частоте, 8° по фазе. Это позволяет приблизить точность оценки положения спектральных составляющих на частотной оси к возможностям периферического слухового анализатора.
4. Разработана методика комплексного статистического оценивания качества передачи вещательного сигнала по каналам и трактам без сохранения формы сигнала, не охваченным существующими нормативными документами. Составлены таблицы допустимых изменений параметров по критерию заметности, балльной оценки, а также определен оптимальный диапазон значений предложенных в работе статистических параметров вещательного сигнала по критерию предпочтительности для информационно-музыкальных

программ. Разработанная методика служит дополнением к существующим нормативным документам, расширяя диапазон их применимости на адаптивные каналы и тракты звукового вещания.

5. Разработано и апробировано программное обеспечение, позволяющее реализовать автоматизированную аппаратную оценку качества передачи вещательного сигнала на основе ПК в мультимедийной комплектации *без вывода тракта передачи из эксплуатации* по критериям заметности искажений и балльной оценки качества передачи.

6. Экспериментально подтверждена возможность использования предложенной методики для настройки и оценки эффективности адаптивных устройств на примере настройки аудиопроцессора АРГО.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи

1. Обнаружение и контроль негативных воздействий телерадиовещания. Депонирована в ЦНТИ «Информсвязь» №2200 св. 2001 от 05.01.2001, с.19-35. - Соавт.: В.А. Абрамов, О.Б. Попов, С.Г. Рихтер
2. Моделирование функциональных преобразований сигналов программ звукового вещания. Депонирована в ЦНТИ «Информсвязь» №2208 св.2002 от 10.06.2002, с.82-85
3. Статистический подход к оценке изменений вещательного сигнала. Депонирована в ЦНТИ «Информсвязь» №2208 св.2002 от 10.06.2002, с.86-94
4. Вопросы объективизации измерений параметров качества звуковых вещательных сигналов// Метрология и измерительная техника связи, 2003. - №2 – с. 27-29. – Соавт.: С.Г. Рихтер, О.Б. Попов.
5. О предварительном нормировании звукового сигнала// Метрология и измерительная техника связи, 2003. - №4 – с.28-29. – Соавт.: С.Г. Рихтер, О.Б. Попов.
6. Качество каналов звукового вещания: всегда ли и всех оно устраивает? (Некоторые особенности передачи и метрологии звуковых вещательных сигналов)// Broadcasting. Телевидение и радиовещание. - №7 (35) – ноябрь, 2003 - (в печати). – Соавт.: С.Г. Рихтер, О.Б. Попов.

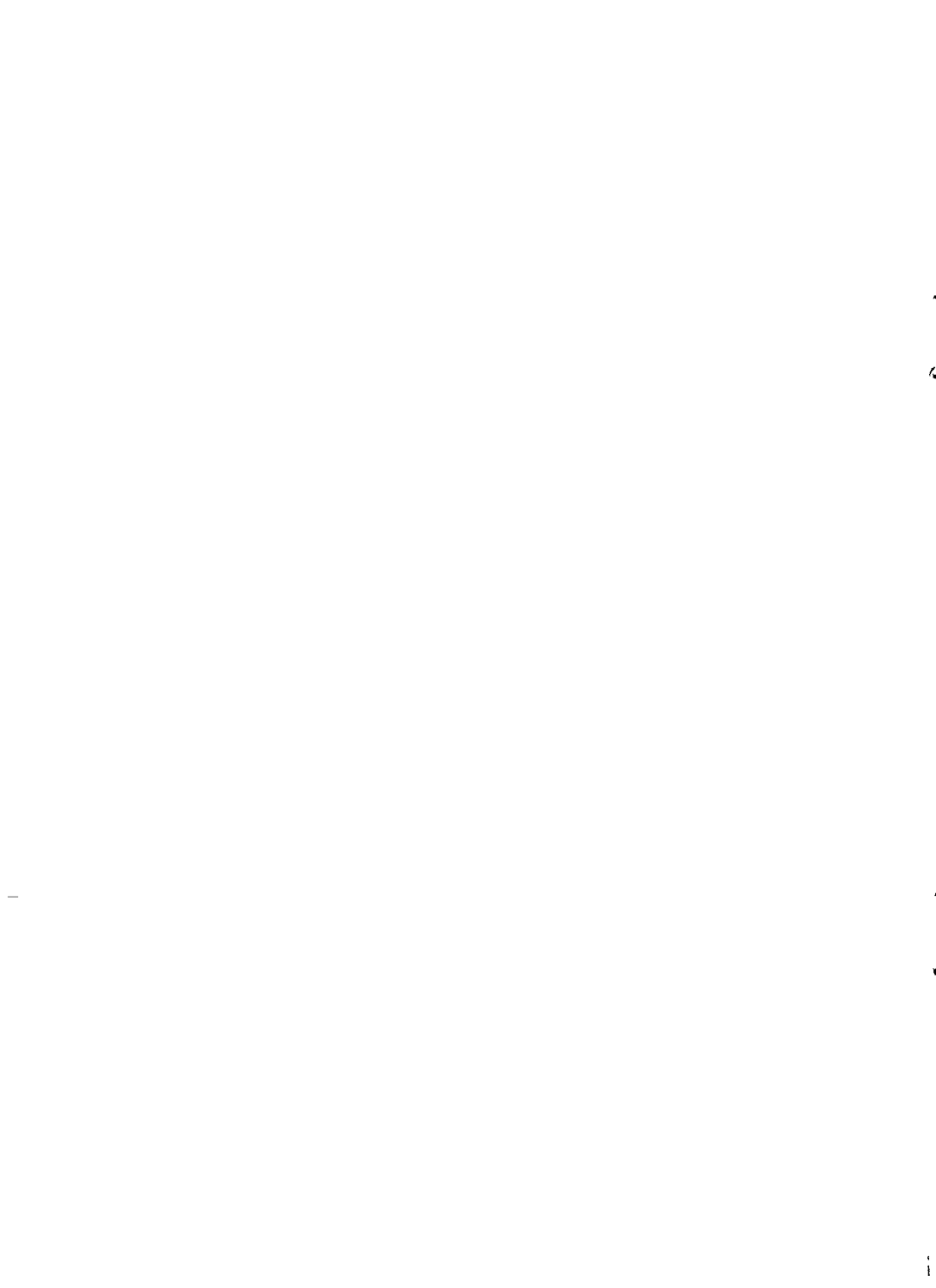
Материалы НТК

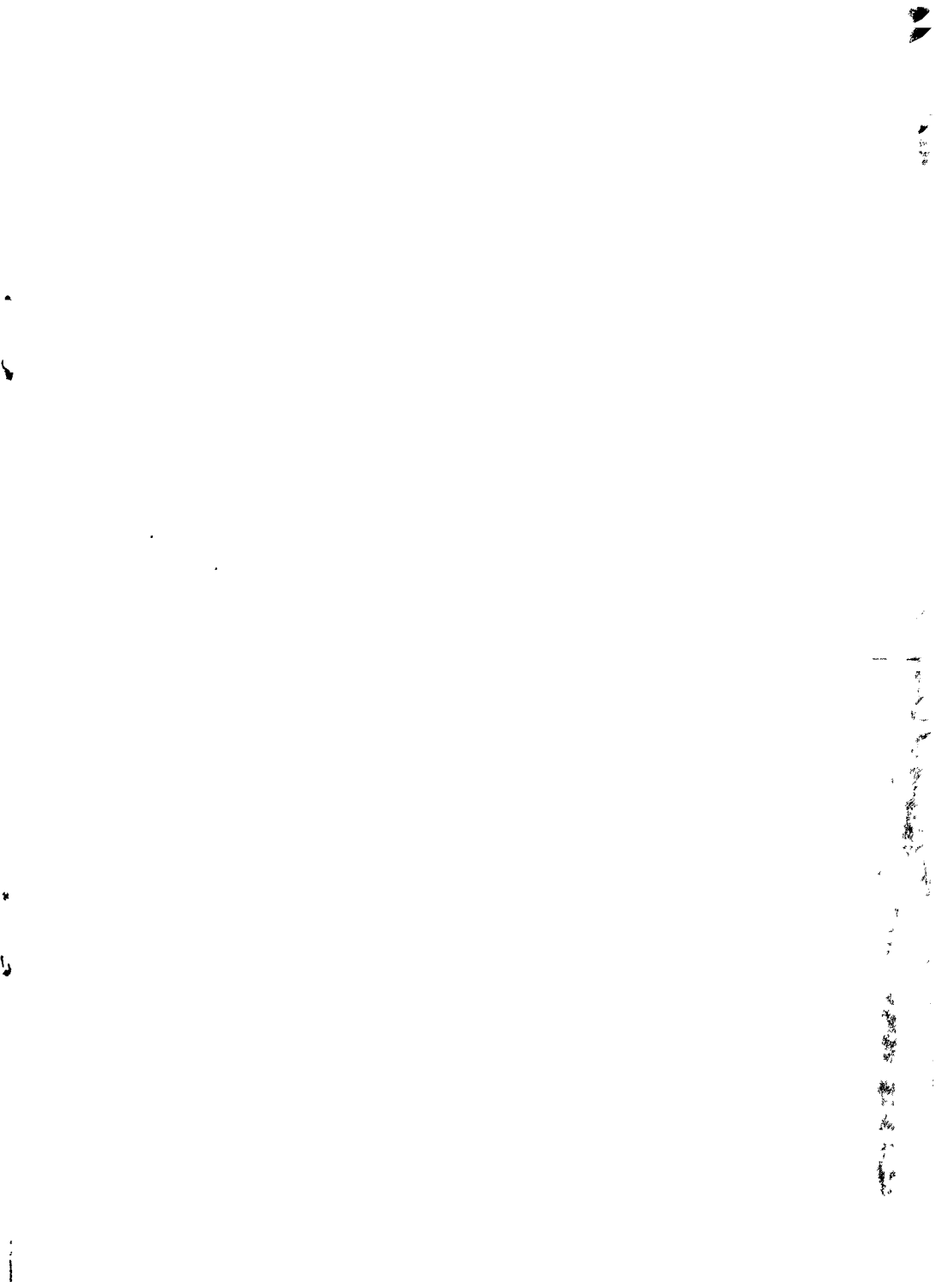
7. Изменение эмоциональности музыкальных программ при временных смещениях // 55-ая студенческая НТК МТУСИ. – Москва, 2000. – Тезисы докладов. с.40-41. – Соавт.: О.Б.Попов
8. Повышение качества домашнего звуковоспроизведения// 55-ая студенческая НТК МТУСИ. – Москва, 2000. – Тезисы докладов с.42-43. – Соавт.: А.П.Ефимов
9. Объединение стереофонических сигналов // 10-ая Межрегиональная конференция МНТОРЭС им. А.С.Попова “Обработка сигналов в системах двусторонней телефонной связи”. – М.: МТУСИ, 2000, тезисы с.130-135. – Соавт.: С.А. Литвин.
10. Придыхание дикторов звукового вещания // Международный форум информатизация. – М.: МТУСИ, 2001, Тезисы докладов конференции. с.91-92.
11. Оценка качества передачи звуковых вещательных сигналов в современных каналах // Научная конференция профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава – М.: МТУСИ, 2003, Материалы конференции. с.95-97. – Соавт.: Попов О.Б., Рихтер С.Г.

Подписано в печать 24.10.03г. формат 60x84/16.

Объем 1,1 усл.п.л. Тираж 100 экз. Заказ 234.

ООО "Пинсвязьиздат". Москва, ул. Авиамоторная, 8.





17337

2003-A

17337